

# 手机内置加速度传感器数据的空间坐标转换算法

赵宏<sup>\*</sup>, 郭立涪

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730050)

(\* 通信作者电子邮箱 594286500@qq.com)

**摘要:**手机内置加速度传感器坐标系固定于设备自身,其采集的数据因手机姿态的改变而不断发生漂移,受此影响即使同一运动过程,加速度数据也难以同前一个时刻保持一致。为解决该问题,提出利用空间坐标转换算法将加速度数据从手机坐标系映射至惯性坐标系,从而确保数据在手机任意姿态下均能准确反映实际的运动状态。为验证该方法的有效性,设计一种手机传感器数据在线采集与实时处理新方法,实现 Matlab 中数据动态特征的实时观测及算法性能的在线评估。利用此方法,在旋转实验中分别测试方向余弦与四元数两种算法的可行性,并在计步器实验中进一步测试四元数算法性能。实验结果表明,基于方向传感器数据的方向余弦算法因测量范围限制,不能实现全方位空间坐标转换;而基于旋转矢量传感器数据的四元数算法则能够实现全方位转换,且转换后的加速度对步态识别率达到 95% 以上,较准确地反映了实际运动状态。

**关键词:**手机内置传感器;数据漂移;空间坐标转换;四元数法;计步器实验

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A

## Space coordinate transformation algorithm for built-in accelerometer data of smartphone

ZHAO Hong<sup>\*</sup>, GUO Lili

(College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

**Abstract:** The coordinate system for smartphones' built-in acceleration sensor is fixed on the equipment itself, the data collected by the smartphone is constantly drifting due to the change of smartphone's posture. Affected by this, even the same movement process, the acceleration is difficult to keep consistent with the previous one. To solve this problem, the acceleration was mapped from smartphone to inertial coordinate system by using space coordinate transformation algorithm, to ensure that the sensor data can accurately reflect actual motion state no matter in what gesture the smartphone is. To verify the effectiveness of this method, a new method for online acquiring and real-time processing smartphone's sensor data was designed. With this method, the feasibilities of direction cosine algorithm and quaternion algorithm were tested in rotation experiments. Then, the performance of quaternion algorithm was further tested in pedometer experiments. The experimental results show that the direction cosine algorithm fails to achieve comprehensive coordinate transformation due to the measurement range limit; while the quaternion algorithm based on rotation vector sensor data can achieve full conversion, and the recognition rate of gait using transformed acceleration is over 95%, which can accurately reflect the actual state of motion.

**Key words:** smartphone built-in sensor; data drift; space coordinate transformation; quaternion algorithm; pedometer experiment

## 0 引言

移动互联网时代,智能手机迅速成为个人计算和通信的核心设备,基于智能手机的感知手段日益丰富,在健康、医疗、生活、交通、教育和娱乐等领域的应用层出不穷。目前智能手机中已内置了种类繁多的传感器,包括加速度传感器、方向传感器、磁力传感器、陀螺仪、旋转矢量传感器、蓝牙等<sup>[1]</sup>。其中加速度传感器的应用尤为广泛,通过集成在硅晶片上的微机电系统测量手机坐标系三轴向的加速度值,从而为感知手机用户运动状态提供极佳途径。

传统外置加速度传感器在实际应用中主要有两种常见处理方法:一种是将加速度传感器设备捆绑在人体固定部位<sup>[2-4]</sup>,故

无需考虑设备姿态变化带来的影响,其缺点是位置固定、灵活性较差,且不符合人们对手机等便携设备的日常使用习惯;二是利用表征人体运动剧烈程度的加速度向量幅值(Signal Vector Magnitude, SVM)来区分不同运动状态<sup>[5-6]</sup>,其计算方法是三个轴向上加速度的平方求和再开方,值越大表明运动越剧烈,显然该值不能反映单个轴向加速度的大小,严重降低了数据可用性。鉴于内置加速度传感器输出值是以手机坐标系为参考<sup>[7]</sup>,难以反映惯性坐标系下手机用户的实际运动状态,本文采用空间坐标转换将加速度数据从手机坐标系映射至相对于地球静止的惯性坐标,从而确保数据在手机任意放置姿态下均能准确反映实际的运动状态。

三维空间数学中,解决坐标旋转问题常用的方法有方向余

收稿日期: 2015-08-29; 修回日期: 2015-09-15。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61262016); 甘肃省自然科学基金资助项目(1208RJZA239)。

作者简介: 赵宏(1971-),男,甘肃西和人,教授,博士,CCF会员,主要研究方向:并行与分布式处理、嵌入式系统、系统建模与仿真; 郭立涪(1989-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统、室内定位。

弦法和四元数法<sup>[8-9]</sup>:当利用方向余弦法进行姿态解算时需获取三个夹角角度数据,四元数法则需获取旋转轴及旋转角度。在智能手机平台中,这些数据可由内置方向传感器和旋转矢量传感器分别测得<sup>[10]</sup>。本文首先研究手机内置传感器系统及上述两种坐标转换算法,并设计一种智能手机传感器数据在线采集与实时处理新方法,该方法能够动态绘制加速度数据波形,实时观测经坐标转换后的加速度随手机姿态改变的变化情况,从而为算法性能的评估提供直接参考;然后,通过旋转实验测试两种坐标转换算法可行性,并在计步器实验中通过 18 组统计结果进一步验证四元数法的有效性。综上所述,本文解决了手机内置加速度传感器数据的空间坐标转换问题,转换后的加速度数据能够准确反映惯性坐标系下的实际运动状态,能为智能手机用户的运动状态检测提供更加有效的测量手段,扩大手机内置加速度传感器的适用范围。

### 1 空间坐标系转换方法

#### 1.1 空间坐标系

手机坐标系是以手机屏幕为基准定义的一种相对坐标系<sup>[11]</sup>。将手机水平放置,屏幕向上,手机屏幕中心为坐标原点,平行于屏幕短边的方向为  $x$  轴正方向,平行于屏幕长边的方向为  $y$  轴正方向,垂直于手机屏幕向上的方向为  $z$  轴正方向,如图 1(a) 所示。世界坐标系是一种绝对坐标系,它通过经纬度和高程描述地球上每个点的方位信息,如图 1(b) 所示。而惯性坐标系作为描述客观世界中物体运动状态的坐标系,可以看作是手机坐标系与世界坐标系之间的中间状态,惯性坐标系的原点与手机坐标系的原点重合,坐标轴与世界坐标系的坐标轴平行。从手机坐标系到惯性坐标系的转换只需要旋转操作,从世界坐标系到惯性坐标系的转换只需要平移操作。

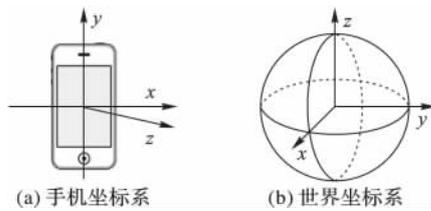


图 1 坐标系示意图

手机内置加速度传感器采集的原始数据反映手机坐标系空间中三轴加速度的大小。在使用中,手机的放置具有随意性,其放置姿态的改变将引起手机坐标系在惯性坐标系空间中的旋转,进而导致三轴加速度的映射量随之发生变化,难以稳定地反映实际的运动状态。因此,需要将采集的原始加速度数据从手机坐标系转换到惯性坐标系。

#### 1.2 内置传感器系统

手机内置加速度传感器通过集成在硅晶片上的微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)来测量  $x, y, z$  三轴的加速度值。常用的加速度传感器包括 BOSCH 的 BMA 系列、AMK 的 897X 系列、ST 的 LIS3X 系列等,这些传感器采用 I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) 或 SPI (Serial Peripheral Interface) 接口与手机 MCU (Micro-Controller Unit) 相连,通常能够提供  $\pm 2G$  至  $\pm 16G$  的加速度测量范围,数据精度大约为 16 b,能够满足绝大部分运动状态检测的需要。手机内置方向传感器通过融合手机内置加速度传感器、地磁场传感器数据,经过计算后得出 azimuth、pitch 和 roll 三轴角度数据,分别与表 1 中

方向传感器的  $values[0]$ 、 $values[1]$  和  $values[2]$  相对应;旋转矢量传感器数据则需要陀螺仪传感器、方向传感器和加速度传感器的数据经过复杂算法计算后得出,其输出为代表当前设备姿态的标准四元数组。然而,上述两种传感器均为算法软实现,没有具体物理传感器装置,其算法为传感器公司私有产权,未对公众开放,用户仅能得到传感器输出数据。手机内置加速度传感器、方向传感器和旋转矢量传感器参数如表 1 所示。

表 1 手机内置传感器参数

传感器类型	输出数据及说明
加速度传感器	$values[0]$ 沿 $x$ 轴的加速度(包括重力) $values[1]$ 沿 $y$ 轴的加速度(包括重力) $values[2]$ 沿 $z$ 轴的加速度(包括重力)
方向传感器	$values[0]$ 绕 $z$ 轴旋转所得角度( $0^\circ \sim 360^\circ$ ) $values[1]$ 绕 $x$ 轴旋转所得角度( $-180^\circ \sim 180^\circ$ ) $values[2]$ 绕 $y$ 轴旋转所得角度( $-90^\circ \sim 90^\circ$ )
旋转矢量传感器	$values[0]$ 旋转向量沿 $x$ 轴的部分( $x^* \sin(\theta/2)$ ) $values[1]$ 旋转向量沿 $y$ 轴的部分( $y^* \sin(\theta/2)$ ) $values[2]$ 旋转向量沿 $z$ 轴的部分( $z^* \sin(\theta/2)$ ) $values[3]$ 旋转向量的数值部分( $\cos(\theta/2)$ )

#### 1.3 方向余弦转换算法

空间解析几何中,一个坐标系相对原坐标系作一次或多次旋转后可以得到另外一个新的坐标系,它们之间的相互关系可用方向余弦来表示。依据此原理,将三轴加速度作为一个向量,它的三个方向余弦分别是该向量与三个坐标轴之间角度的余弦,这样就可建立手机坐标系到惯性坐标系之间的转换矩阵。分别用  $xi, yj, zk$  表示手机坐标系中三轴加速度,  $x'i', y'j'$  和  $z'k'$  表示惯性坐标系中三轴加速度,因加速度向量  $A$  是唯一的,则满足式(1):

$$A = x'i' + y'j' + z'k' = xi + yj + zk \tag{1}$$

将式(1)后两项用矩阵形式表示,移项整理后可以得到式(2):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \cdot i' & j \cdot i' & k \cdot i' \\ i \cdot j' & j \cdot j' & k \cdot j' \\ i \cdot k' & j \cdot k' & k \cdot k' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \tag{2}$$

由向量乘法运算知,两个单位向量相乘等于它们夹角的余弦值,所以式(2)可以表示为式(3):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \cos(\theta_2) & \cos(\theta_3) \\ \cos(\beta_1) & \cos(\beta_2) & \cos(\beta_3) \\ \cos(\gamma_1) & \cos(\gamma_2) & \cos(\gamma_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \tag{3}$$

由表 1 知,手机方向传感器可以提供当前设备姿态数据,分别为航向角  $\psi$ 、俯仰角  $\theta$  和滚转角  $\gamma$ 。根据空间几何原理,手机呈现某姿态可以理解为从惯性坐标系开始依次按照三个角度旋转后所得,具体转换过程可分为三步,如图 2 所示。

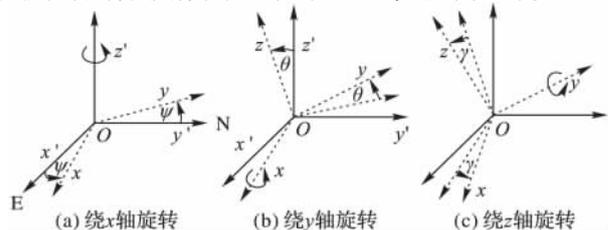


图 2 坐标系转换分解

在右手笛卡尔坐标系中,绕坐标轴的三维旋转变换可以用矩阵形式表示:

式(4)为绕 z 轴的旋转,其中  $\psi$  是方向传感器提供的 values [0] 值:

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(5)为绕 x 轴的旋转,其中  $\theta$  是方向传感器提供的 values [1] 值:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(6)为绕 y 轴的旋转,其中  $\gamma$  是方向传感器提供的

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\gamma) - \sin(\psi)\sin(\theta)\sin(\gamma) & \sin(\psi)\cos(\gamma) + \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\gamma) & -\cos(\theta)\sin(\gamma) \\ -\sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(\psi)\sin(\gamma) + \sin(\psi)\sin(\theta)\cos(\gamma) & \sin(\psi)\sin(\gamma) - \cos(\psi)\sin(\theta)\cos(\gamma) & \cos(\theta)\cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(8)就可以求出惯性坐标系下各轴向的加速度值,分别为  $x', y'$  和  $z'$ 。

#### 1.4 四元数转换算法

数学家欧拉证明了一个旋转序列等价于单个旋转,3D 中任意角位移都可以表示为绕单一轴的单次旋转<sup>[12-13]</sup>。当空间中一个旋转变换用上述形式来描述时,被称为轴-角描述法,然而实际应用中为了计算方便,轴-角对常被四元数所替代。四元数的数学概念是 1843 年由爱尔兰数学家 W. R. Hamilton 首先提出的,它用四个数来表达空间旋转,其中包含一个标量分量和一个向量分量,既表示了转轴的方向,又表示了转角的大小。如果将一个空间向量乘以一个四元数,则相当于向量绕着该四元数所描述的旋转轴转动它所描述的角度,从而得到一个新的向量。因此,将手机坐标系中的三轴加速度作为一个向量,利用四元数法则可实现从手机坐标系到惯性坐标系的转换。

四元数作为描述空间旋转的数学工具,由一个实单位  $\lambda$  和三个虚数单位  $i, j, k$  组成,其中  $\lambda, p_1, p_2, p_3$  为实数,其一般形式定义如下:

$$q = \lambda + p_1 i + p_2 j + p_3 k \quad (9)$$

在计算中,常用式(10)的四元数来表示一个旋转过程,其中:  $n$  为旋转轴,  $\theta$  为旋转角度,并规定向量  $n$  为单位向量。

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} n \quad (10)$$

下面来推导绕轴  $n$  旋转角度  $\theta$  的矩阵,即满足式(11)的矩阵  $R(n, \theta)$ 。

$$vR(n, \theta) = v' \quad (11)$$

其中  $v'$  为向量  $v$  绕轴  $n$  旋转后的向量。为了能够用  $v, n, \theta$  表示  $v'$ ,作以下处理:将  $v$  分解为  $v_{\parallel}$  和  $v_{\perp}$  两个分量,分别平行和垂直于轴  $n$ 。因  $v_{\parallel}$  平行于  $n$ ,绕  $n$  旋转不会对其造成影响,故只要计算出  $v_{\perp}$  绕  $n$  旋转后的  $v'_{\perp}$  就可得  $v' = v_{\parallel} + v'_{\perp}$ 。为此构造向量  $v_{\parallel}, v_{\perp}$  和临时向量  $w$ ,其中  $w$  向量长度与  $v_{\perp}$  相等,且同时垂直于  $v_{\parallel}$  和  $v_{\perp}$ ,即可认为  $w$  是  $v_{\perp}$  绕  $n$  旋转  $90^\circ$  所得,如图 3 所示。

$$R(n, \theta) = \begin{bmatrix} n_x^2(1 - \cos(\theta)) + \cos(\theta) & n_x n_y(1 - \cos(\theta)) + n_z \sin(\theta) & n_x n_z(1 - \cos(\theta)) - n_y \sin(\theta) \\ n_x n_y(1 - \cos(\theta)) - n_z \sin(\theta) & n_y^2(1 - \cos(\theta)) + \cos(\theta) & n_y n_z(1 - \cos(\theta)) + n_x \sin(\theta) \\ n_x n_z(1 - \cos(\theta)) + n_y \sin(\theta) & n_y n_z(1 - \cos(\theta)) - n_x \sin(\theta) & n_z^2(1 - \cos(\theta)) + \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (15)$$

显然,式(15)中利用  $n$  和  $\theta$  表示旋转矩阵,而由表 1 知手机内置旋转矢量传感器输出为标准四元组,其中  $\lambda, p_1, p_2$  和

values [2] 值:

$$R(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 & -\sin(\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (6)$$

将这三个基本旋转序列以适当顺序连接,可生成组合后的旋转矩阵,本文以常用的  $z-x-y$  序列旋转,得旋转矩阵(7):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 & -\sin(\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (7)$$

最后,将式(7)整理可得如下所示式(8):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\gamma) - \sin(\psi)\sin(\theta)\sin(\gamma) & \sin(\psi)\cos(\gamma) + \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\gamma) & -\cos(\theta)\sin(\gamma) \\ -\sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(\psi)\sin(\gamma) + \sin(\psi)\sin(\theta)\cos(\gamma) & \sin(\psi)\sin(\gamma) - \cos(\psi)\sin(\theta)\cos(\gamma) & \cos(\theta)\cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (8)$$

由图 3 描述的向量关系可列出等式,如式(12)所示。

$$\begin{cases} v'_{\perp} = v_{\perp} \cos(\theta) + w \sin(\theta) \\ v_{\perp} = v - v_{\parallel} \\ v_{\parallel} = (v \cdot n)n \\ w = n \times v_{\perp} \end{cases} \quad (12)$$

经代换运算,可得  $v, n, \theta$  与  $v'$  的关系式如下:

$$v' = (v - (v \cdot n)n) \cos(\theta) + (n \times v) \sin(\theta) + (v \cdot n)n \quad (13)$$

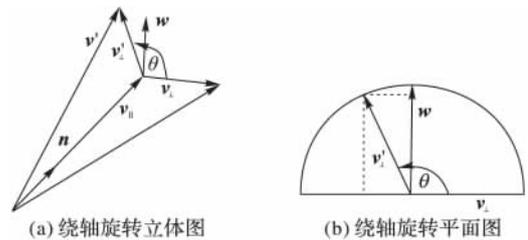


图 3 绕轴旋转示意图

然后,利用式(13)计算变换后的基向量并构造矩阵,其中第一个基向量为:  $p = [1 \ 0 \ 0]$ ,将式(13)中的  $v$  用  $p$  代入,则得计算式(14)如下:

$$p' = (p - (p \cdot n)n) \cos(\theta) + (n \times p) \sin(\theta) + (p \cdot n)n = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \cos(\theta) + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sin(\theta) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x^2(1 - \cos(\theta)) + \cos(\theta) \\ n_x n_y(1 - \cos(\theta)) + n_z \sin(\theta) \\ n_x n_z(1 - \cos(\theta)) - n_y \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (14)$$

类似地,可以推导出另外两个基向量  $q'$  和  $r'$ ,用这三个基向量则可构造出 3D 中绕任意转轴的旋转矩阵  $R(n, \theta)$ ,如式(15)所示:

$p_3$  分别由数值 values [3]、values [0]、values [1] 和 values [2] 提供,形式如(16)所示。

$$\begin{cases} \lambda = \cos(\theta/2) \\ p_1 = \mathbf{n}_x \sin(\theta/2) \\ p_2 = \mathbf{n}_y \sin(\theta/2) \\ p_3 = \mathbf{n}_z \sin(\theta/2) \end{cases} \quad (16)$$

将式(15)变形并代入 $\lambda, p_1, p_2$ 和 $p_3$ 来替换式(15)中的 $n$ 和 $\theta$ ,实际上该过程是一个技巧性很强的推导,这里不作展开。通过四元数构造的旋转矩阵,如式(17)所示。

$$\begin{bmatrix} \lambda^2 + p_1^2 - p_2^2 - p_3^2 & 2(p_1p_2 + \lambda p_3) & 2(p_1p_3 - \lambda p_2) \\ 2(p_1p_2 - \lambda p_3) & \lambda^2 + p_2^2 - p_1^2 - p_3^2 & 2(p_2p_3 + \lambda p_1) \\ 2(p_1p_3 + \lambda p_2) & 2(p_2p_3 - \lambda p_1) & \lambda^2 + p_3^2 - p_1^2 - p_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' & y' & z' \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

最后,根据式(17)就可求出转换后的各轴向的加速度值,分别为 $x', y', z'$ 。

## 2 验证实验与分析

### 2.1 实验设计

为实时观测手机内置传感器数据变化及评估两种算法性能,本文提出一种利用蓝牙通信手段将传感器数据同步发送至上位机 Matlab 软件来实现手机内置传感器数据在线采集与实时处理新方法。该方法有助于传感器数据动态特征的捕获、提取、分析;实时评估、对比不同数据处理算法实时性能;动态绘制数据实时波形曲线,能直观反映数据状态。此外,该

$$M = \begin{bmatrix} Acc_{x1} & Acc_{y1} & Acc_{z1} & Rot_{x1} & Rot_{y1} & Rot_{z1} & Rot_{q1} \\ Acc_{x2} & Acc_{y2} & Acc_{z2} & Rot_{x2} & Rot_{y2} & Rot_{z2} & Rot_{q2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Acc_{xn} & Acc_{yn} & Acc_{zn} & Rot_{xn} & Rot_{yn} & Rot_{zn} & Rot_{qn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ori_{x1} & Ori_{y1} & Ori_{z1} \\ Ori_{x2} & Ori_{y2} & Ori_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Ori_{xn} & Ori_{yn} & Ori_{zn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中: $Acc_{x1}, Acc_{y1}$ 和 $Acc_{z1}$ 是内置加速度传感器三个轴向上数据在惯性坐标系中的映射值; $Rot_{x1}, Rot_{y1}, Rot_{z1}$ 和 $Rot_{q1}$ 是旋转矢量传感器的四个输出; $Ori_{x1}, Ori_{y1}$ 和 $Ori_{z1}$ 是方向传感器三个轴向输出; $n$ 为读入数据长度。

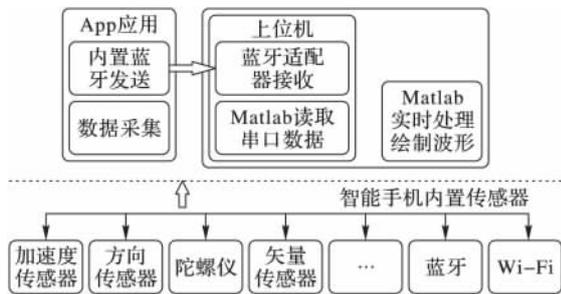


图4 设计框架

然而,手机蓝牙通信利用 Socket 方式进行数据传输,其接收端和发送端的数据均为字符流格式<sup>[14]</sup>,因此,数据在发送前需按照预定义格式将数据进行拼接组装,在接收时则需要按照预定义格式将数据进行解析,并且要确保接收数据的完整性。本文采集加速度传感器、方向传感器、旋转矢量传感器共 3 路 10 组数据,通过在同组数据中插入空格字符,不同组数据间插入特定标记字符的传输格式来实现字符流的拼接与解析,其解析过程如下所示:

```
while all % all 为完整帧标记
    data_char = '';
    while true
        ch = fread(s, 1); % 读取一个字符
        if ch == 32 % 有空格则停止
```

方法实时发送传感器原始数据,不仅避免大量数据存储对手机内存空间的占用,而且无线传输使设备摆脱物理传输线路限制,增强移动灵活性,便于大幅度、特定姿态下实验数据采集。

该方法包括手机内置传感器数据采集、手机与上位机之间数据传输、上位机 Matlab 中虚拟串口数据读取及动态波形实时绘制三部分。其整体框架如图 4 所示,具体操作步骤如下:

1) 安装手机 App,其具有传感器数据采集和蓝牙通信功能。手机传感器数据采集的一般方法是通过调用系统服务获取传感器管理器,注册并添加权限,然后通过指定传感器参数来对不同传感器数据进行采集。

2) 上位机开启蓝牙功能,通过蓝牙适配器驱动创建蓝牙通信虚拟串口,在设备管理器中查看并打开串口,完成上述操作后上位机即作为蓝牙通信服务端等待手机配对请求。

3) 打开手机 App,选择传感器类型,设定采样频率并启动蓝牙,根据预置蓝牙名搜索上位机蓝牙适配器,并与其建立连接。连接成功后,App 将通过手机蓝牙模块向上位机在线发送内置传感器采集的数据。

4) 上位机中 Matlab 软件调用相关函数读取串口收到的数据,经解析后将字符流转化为可计算的数值类型,然后调用转换算法进行处理,并将结果数据迭代存入矩阵  $M$  中,如式(18)所示:

```
data = data_char;
break
end
if ch == 115 % 停止符
    flag = false;
end % 先高位后低位追加
data_char = strcat(data_char, ch);
end
A = regexp(data_char, 'A', 'split');
[dim1, dim2] = size(A);
if dim2 ~ = 4
    break
end
Ax = str2double(char(A(1)));
Ay = str2double(char(A(2)));
Az = str2double(char(A(3)));
AA = char(A(4));
R = regexp(AA, 'R', 'split');
Rx = str2double(char(R(1)));
Ry = str2double(char(R(2)));
Rz = str2double(char(R(3)));
Rq = str2double(char(R(4)));
AAA = char(R(5));
O = regexp(AAA, 'O', 'split');
Ox = str2double(char(O(1)));
Oy = str2double(char(O(2)));
Oz = str2double(char(O(3)));
all = false;
end
```

随着新解析的数据不断加入矩阵,数据规模的不断增长将导致计算机内存大量消耗。而我们关注的数据是最近的、能反映最新状态的数据,故文中作以下处理:每当矩阵中有新数据加入时,就把矩阵中最早的一组数据删除,这样通过不断迭代新数据存入  $M$  矩阵中,从而维持矩阵的长度为固定值。然后,通过定时调用绘图函数绘制当前矩阵中数据波形,并移动坐标轴,从而实现数据波形动态显示。流程如图 5 所示。

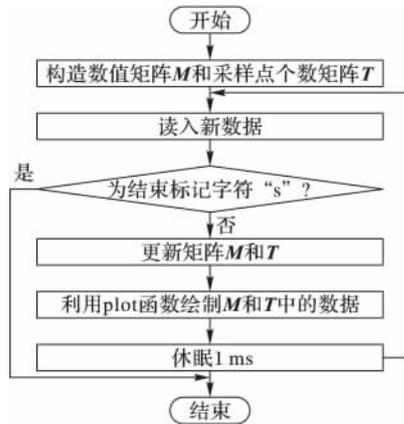


图 5 数据波形动态绘制流程

### 2.2 旋转实验

由于地球引力的存在,手机内置加速度传感器总受到重力加速度的作用,并且随着手机放置姿态的不同,重力在手机坐标系三个轴向上的映射分量也在不断发生变化。我们知道在惯性坐标系下,重力的大小和方向始终稳定且竖直向下指向地心方向。鉴于此,本文巧妙地利用该现象设计对比实验,通过观察经坐标系转换后重力加速度在手机  $z$  轴向上投影分量变化的稳定性来评估坐标系转换算法的实际效果。

图 6 为手机绕坐标系  $x$  轴缓慢匀速旋转  $360^\circ$  所得,其中横轴采样个数仅与实验中手机旋转速度的快慢有关。图 6(a) 表示绕  $x$  轴旋转过程中,手机姿态角度的变化;图 6(b) 的三条曲线分别表示受重力作用下手机坐标系  $z$  轴加速度和经四元数算法及方向余弦算法处理后  $z$  轴加速度的改变情况。由图中可知,随着手机姿态角度的改变,手机坐标系下  $z$  轴重力加速度分量也不断发生漂移,而经过四元数和方向余弦坐标转换算法处理后的  $z$  轴加速度值均与惯性坐标系下重力加速度吻合,且始终稳定在  $9.8 \text{ m/s}^2$  左右。

图 7 为手机绕坐标系  $y$  轴缓慢匀速旋转  $360^\circ$  所得,其中横轴采样个数仅与实验中手机旋转速度的快慢有关。图 7(a) 表示绕  $y$  轴旋转过程中,手机姿态角度的变化;图 7(b) 的三条曲线分别表示受重力作用下手机坐标系  $z$  轴加速度和经四元数算法及方向余弦算法处理后  $z$  轴加速度的改变情况。由图中可知旋转过程中,经方向余弦算法处理的加速度值在 BC 段出现大幅度漂移现象,经分析,由上文表 1 知手机内置方向传感器仅提供绕  $y$  轴  $-90^\circ \sim 90^\circ$  范围的角度,未能实现  $360^\circ$  全部角度测量,导致手机中方向余弦算法不能实现全姿态坐标转换,即当手机旋转超出该测量范围,手机屏幕开始朝向下方向时就会导致图中 BC 段异常的发生,而在该测量范围内的 AB、CD 段则保持稳定。同时,由图中可知经四元数算法处理的加速度值在整个旋转过程中始终稳定在  $9.8 \text{ m/s}^2$  左右。因手机绕坐标系  $z$  轴的旋转并不会对竖直方向上的重力加速度造成影响,故无需额外实验验证。至此,验证了手机中可以利用四元数算法实现加速度传感器数据从手机坐标系到惯性坐标系的稳定转换。

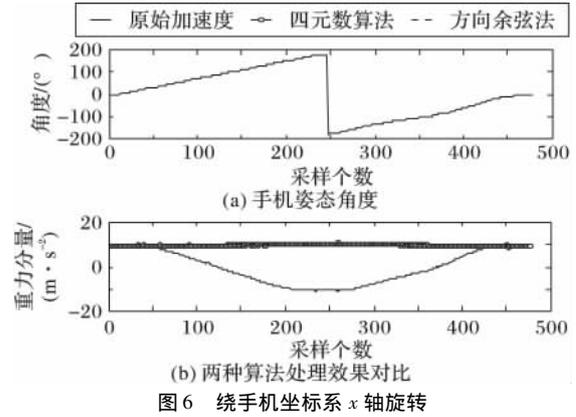


图 6 绕手机坐标系  $x$  轴旋转

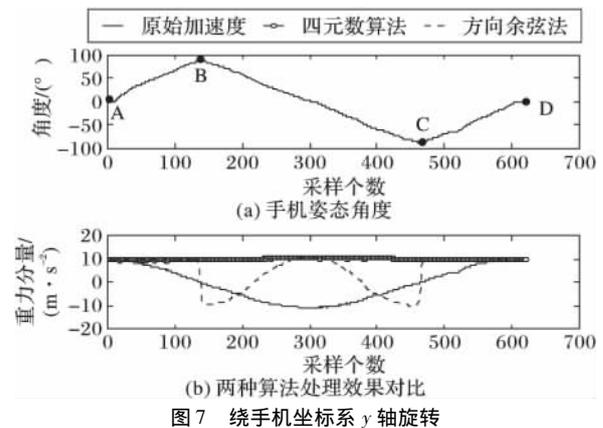


图 7 绕手机坐标系  $y$  轴旋转

### 2.3 计步器实验

由上文知四元数法可实现手机加速度传感器数据从手机坐标系到惯性坐标系的转换。下面将通过计步器实验对四元数空间坐标转换算法性能作进一步测试,以检测转换后的加速度是否能够准确反映惯性坐标系下加速度的变化情况。

实验中,将手机分别置于测试者身体不同部位,利用手机在行走中竖直方向加速度的变化来统计行走步数。将手机置于上衣口袋,行走 50 步波形如图 8 所示。实验中所使用的两部手机型号分别为三星 GALAXY S5 和小米 Mi3,两款手机都内置了实验所需的旋转矢量传感器和蓝牙模块,利用上文所述的实验方法进行测试。实验步骤如下:首先,将手机以任意姿态置于测试者口袋,记录行走过程中手机  $Z$  轴向上加速度值,经坐标转换后其数据波形如图 8(a) 所示。然后,利用测试者行走步态特征寻找波峰个数,这里依据先验知识设步幅阈值为 7.5,采样点间隔个数为 11,图 8(a) 中所示横线即为步幅阈值,因为阈值以下部分波动更具规律性,所以将大于阈值的点赋值为 7.5,并将全部数据取反,统计波峰个数,如图 8(b) 所示。最后,通过设定采样点间隔阈值,将小于 11 的噪点剔除,就可得到行走步数,如图 8(c) 所示。

实验中,测试以下三种情况,即分别将手机平放握于胸前、置于上衣口袋及裤子侧边口袋。此外,在这三种情况下,又分别测试自然行走中 10、50、100、150、300、500 步共 18 组计步器实验,统计数据如表 2 所示。其中:S5 和 M3 分别代表三星 GALAXY S5 和小米 Mi3 手机,A 代表将手机平放并握于胸前,B 代表置于上衣口袋,C 代表置于裤子侧边口袋。A 中将手机固定是为了防止手机姿态改变,确保手机  $Z$  轴向上加速度的稳定。与 A 中手机固定姿态相比,B、C 中手机的任意姿态放置也取得较准确的步数统计结果,且准确率与 A 接近。结果表明,通过四元数算法进行坐标系转换后的加速度

能够准确、有效地反映实际惯性坐标系下加速度的变化。

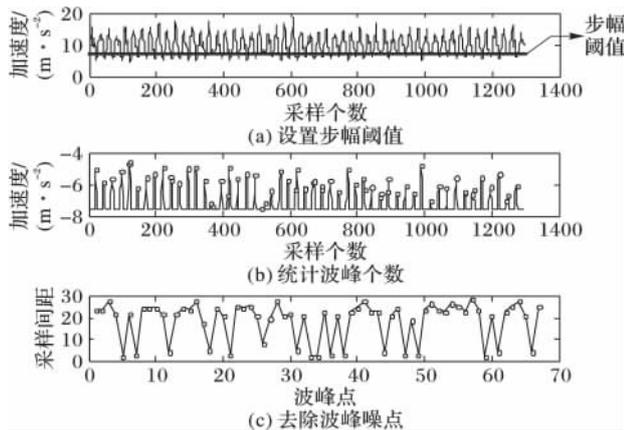


图 8 计步器实验中加速度波形图

表 2 计步器实验统计结果

步数	手机位置	统计步数		误差值		准确率/%	
		S5	M3	S5	M3	S5	M3
10	A	9	9	1	1	90.0	90.0
	B	9	9	1	1	90.0	90.0
	C	9	10	1	0	90.0	100.0
50	A	53	52	3	2	94.0	96.0
	B	46	45	4	5	92.0	90.0
	C	43	49	3	1	86.0	98.0
100	A	103	98	3	2	97.0	98.0
	B	96	103	4	3	96.0	97.0
	C	96	97	4	3	96.0	97.0
150	A	151	149	1	1	99.3	99.3
	B	148	153	2	3	98.6	98.0
	C	145	151	5	1	96.6	99.3
300	A	300	301	0	1	100.0	99.7
	B	298	298	2	2	99.3	99.3
	C	297	300	3	0	99.0	100.0
500	A	499	500	1	0	99.8	100.0
	B	499	502	1	2	99.8	99.6
	C	502	500	2	0	99.6	100.0

### 3 结语

本文围绕手机内置传感器系统,利用空间数学知识,将方向余弦算法和四元数算法应用到手机加速度传感器数据的坐标转换中,解决了加速度数据随手机姿态改变而发生漂移的问题,能确保手机在任意姿态下加速度数据的准确性,这为手机内置加速度传感器更广泛的应用提供了基础。此外,本文设计的一种手机传感器数据在线采集与实时处理方法,具有在线、实时、直观的特点,可有效应用于对手机传感器数据的分析及研究。

#### 参考文献:

[1] 陈龙彪,李石坚,潘纲. 智能手机: 普适感知与应用[J]. 计算机学报, 2015, 38(2): 423 - 438. (CHEN L B, LI S J, PAN G. Smartphone: pervasive sensing and applications [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(2): 423 - 438.)

[2] 王荣,章韵,陈建新. 基于三轴加速度传感器的人体跌倒检测系统设计与实现[J]. 计算机应用, 2012, 32(5): 1450 - 1452. (WANG R, ZHANG Y, CHEN J X. Design and implementation of fall detection system using tri-axis accelerometer [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(5): 1450 - 1452.)

[3] MIZELL D. Using gravity to estimate accelerometer orientation [C]//

ISWC '03: Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 252.

[4] 张凯,周侃,陆钧. 基于 S3C2440 的公交车舒适性监控与评价系统[J]. 电子器件, 2014, 37(4): 728 - 732. (ZHANG K, ZHOU K, LU J. Evaluating and monitoring the performance of bus service based on S3C2440 [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(4): 728 - 732.)

[5] LU H, YANG J, LIU Z G, et al. The Jigsaw continuous sensing engine for mobile phone applications [C]// SenSys '10: Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2010: 71 - 84.

[6] 曹玉珍,蔡伟超,程旸. 基于 MEMS 加速度传感器的人体姿态检测技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2010, 8(1): 37 - 41. (CAO Y Z, CAI W C, CHENG Y. Body posture detection technique based on mems acceleration sensor [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2010, 8(1): 37 - 41.)

[7] KOMATINENI S, MACLEAN D. 精通 Android 3 [M]. 杨越, 曾少宁, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 728 - 733. (KOMATINENI S, MACLEAN D. Pro Android 3 [M]. YANG Y, ZENG S N, translated. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011: 728 - 733.)

[8] 刘莎莎. 基于智能手机的上下公交车行为识别研究与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013: 23 - 27. (LIU S S. Research and implementation of getting on and off bus activities recognition on smartphone [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013: 23 - 27.)

[9] 刘悦群. 基于轨迹还原的智能手机室内定位系统的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 22 - 25. (LIU Y W. Design and implementation of indoor localization system based on trajectory restoration using smartphone [D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 22 - 25.)

[10] 关东升. Android 开发案例驱动教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 464 - 466. (GUAN D S. Android practical guide [M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 464 - 466.)

[11] 张勇. Google Android 开发技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011: 124 - 127. (ZHANG Y. Google Android development technology [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2011: 124 - 127.)

[12] DUNN F, PARBERRY I. 3D math primer for graphics and game development [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 89 - 91.

[13] LENGYEL E. Mathematics for 3D game programming and computer graphics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 41 - 43.

[14] 王春波,赵建平,冯宇. 基于蓝牙的 Ad Hoc 网络研究与实现[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2014, 32(1): 101 - 105. (WANG C B, ZHAO J P, FENG Y. Design and implementation of Ad Hoc network based on bluetooth [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2014, 32(1): 101 - 105.)

#### Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61262016), the Natural Science Foundation of Gansu Province (1208RJZA239).

**ZHAO Hong**, born in 1971, Ph. D., professor. His research interests include parallel and distributed processing, embedded system, system modeling and simulation.

**GUO Lili**, born in 1989, M. S. candidate. His research interests include embedded system, indoor location.